



HAL
open science

Les fermentations : des savoir-faire traditionnels et empiriques aux procédés maîtrisés, porteurs d'innovations.

Yves Le Loir

► To cite this version:

Yves Le Loir. Les fermentations : des savoir-faire traditionnels et empiriques aux procédés maîtrisés, porteurs d'innovations.. ValorialConnection: Les fermentations, sources d'innovations durables, valorial, Feb 2024, Lamballe, France. hal-04440517

HAL Id: hal-04440517

<https://hal.inrae.fr/hal-04440517v1>

Submitted on 6 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



INRAE

L'INSTITUT
agro Rennes
Angers

➤ Les fermentations : des savoir-faire traditionnels et empiriques aux procédés maîtrisés, porteurs d'innovations.

➤ Fermentations ? Quelles fermentations ?

➤ Les fermentations traditionnelles... ou pas !

La fermentation de biomasse

Production d'énergie à partir de biomasse (co-produits...)

Les fermentations traditionnelles

Conservation et transformation des denrées alimentaires

La fermentation de précision

Production de composés pharmaceutiques ou alimentaires



INRAE

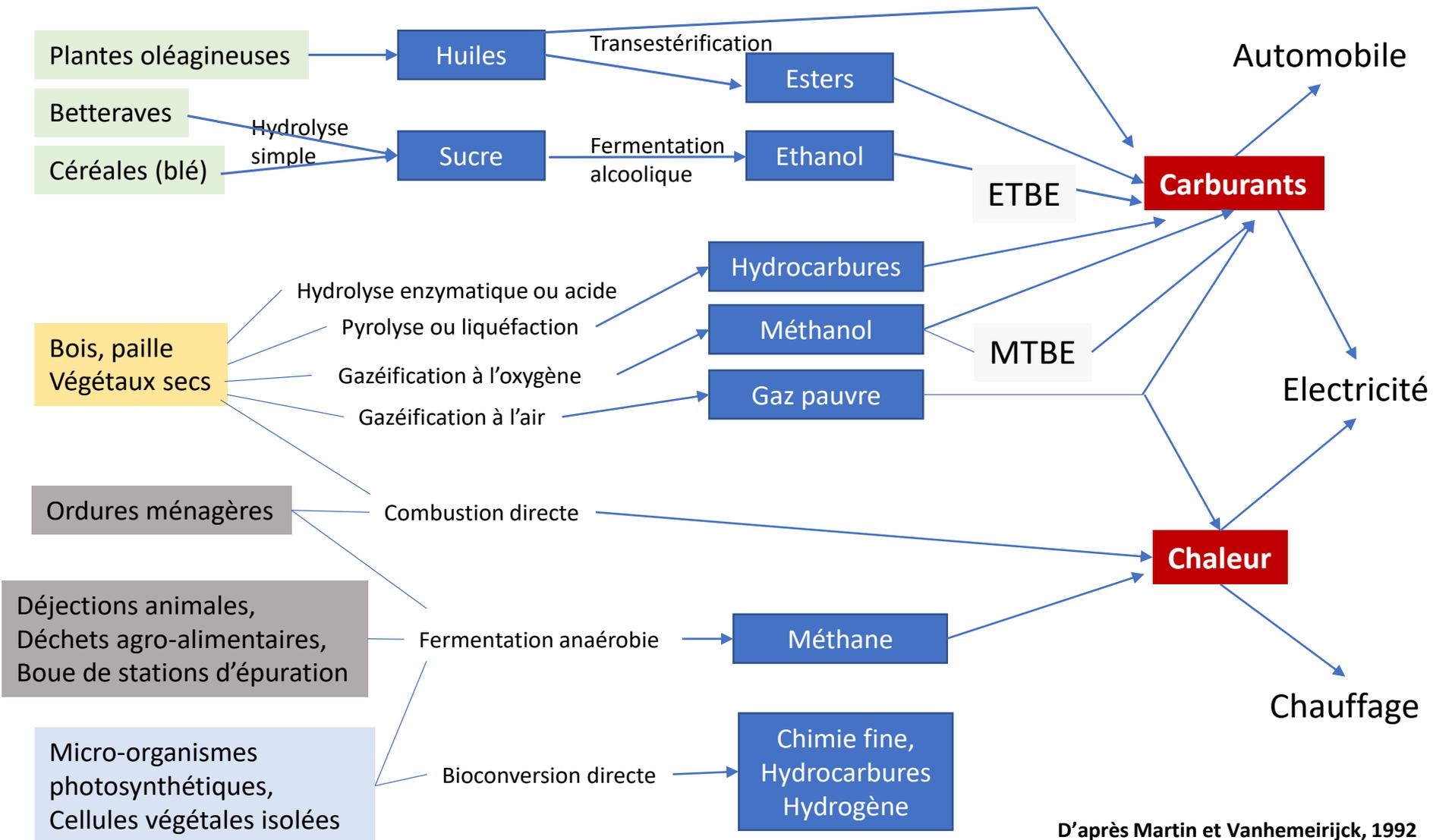
L'INSTITUT
agro Rennes
Angers

 STLO

 **Qualiment**
LABELLISÉ CARROT
Réseau de recherche pour l'innovation alimentaire

➤ Fermentation de biomasse

➤ Les fermentations de biomasse



D'après Martin et Vanhemeirijck, 1992

➤ Fermentation alimentaire

➤ La fermentation, définition

→ Processus métabolique anaérobie convertissant généralement des glucides en acides, en gaz ou en alcools pour générer de l'énergie chimique.

→ Le plus souvent assurée par des microorganismes.

→ Fermentations alimentaires = un des plus anciens modes de conservation de denrées périssables.

→ Transformation radicale de la matière première et production d'acides organiques et de composés d'intérêt → action et bénéfice bien au-delà de la simple conservation.

Apports nutritifs, qualités organoleptiques, biopréservation, immunomodulation, interactions aliment-microbiote-santé...



INRAE

L'INSTITUT
agro
Rennes
Angers

STLO

Qualiment
LABELLISÉ CARROT
Réseau de recherche pour l'innovation alimentaire

➤ Les fermentations alimentaires

Type de Fermentation	Substrat	Produits finaux	Microorganismes Impliqués
Acide lactique	Sucres		
Homolactique		Acide Lactique	<i>Lactococcus lactis</i> ; <i>Streptococcus thermophilus</i> ; <i>Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus</i> ; <i>Lactobacillus acidophilus</i> ; <i>Lactobacillus helveticus</i> ; <i>Pediococcus</i> ; <i>Enterococcus</i>
Hétérolactique		Acide Lactique, éthanol, CO ₂	<i>Leuconostoc</i> ; <i>Fructilactobacillus sanfranciscensis</i> ; <i>Levilactobacillus brevis</i> ; <i>Limosilactobacillus fermentum</i> ; <i>Limosilactobacillus reuteri</i> ; <i>Lactocaseibacillus casei</i> ; <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> ; <i>Latilactobacillus curvatus</i>
Ethanol	Sucres	Ethanol, CO ₂	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ; <i>Zymomonas mobilis</i>
Acétique	Ethanol	Acide Acétique	<i>Acetobacter</i> ; <i>Komagataeibacter</i>
Propionique	Acide Lactique	Acide Propionique, Acide Acétique, CO ₂	<i>Propionibacterium freudenreichii</i> ; <i>Propionibacterium jensenii</i> ; <i>Propionibacterium thoenii</i> ; <i>Propionibacterium acidipropionici</i> ; <i>Propionibacterium cyclohexanicum</i>
Citrique	Acide Citrique	Acétate, Formate, Ethanol, 2,3-butanediol, Diacétyl, Acétoïne, CO ₂ , Lactate	<i>Lactococcus lactis subsp. lactis biovar diacetylactis</i> ; <i>Leuconostoc</i> ; <i>Enterococcus</i> ; <i>Lactobacillus</i> ; <i>Oenococcus oeni</i>
Malolactique	Acide Malique	Acide Lactique, CO ₂	<i>Oenococcus oeni</i> ; <i>Lactobacillaceae</i> ; <i>Pediococcus</i>

➤ Les composés bioactifs produits par fermentation

Composés bioactifs	Souches productrices	Produits alimentaires	Effets santé
Thiamine (B1)/Riboflavine (B2)	<i>Lactobacillus casei</i> KNE-1 <i>Bifidobacterium infantis</i> CCRC14633 <i>Bifidobacterium longum</i> B6 <i>Lactobacillus plantarum</i> CRL 2130	Laits fermentés Jus de soja fermenté Jus de soja fermenté Jus de soja fermenté	Enrichissement en vitamines
Biotine (Vitamine B7)	<i>Lactobacillus helveticus</i> MTCC5463	Lait fermenté	Enrichissement en vitamines
Cobalamine (Vitamine B12)	<i>Propionibacterium freudenreichii</i> <i>Bifidobacterium animalis</i> Bb12 <i>Lactobacillus reuteri</i> ZJ03	Kefir Lait fermenté Yaourt de soja	Enrichissement en vitamines
Acide folique (Vitamine B9)	<i>Streptococcus thermophilus</i> CRL803/CRL415 <i>Lactobacillus bulgaricus</i> CRL871 <i>Bifidobacterium lactis</i> CSCC5127 <i>Bifidobacterium infantis</i> CSCC5187 <i>Bifidobacterium breve</i> CSCC5181 <i>Lactobacillus amylovorus</i> CRL887	Yaourt Yaourt Lait fermenté Lait fermenté Lait fermenté Lait fermenté	Enrichissement en vitamines
GABA	<i>Lactobacillus casei</i> Shirota <i>Streptococcus salivarius</i> fmb5 <i>Lactobacillus plantarum</i> NDC75017 <i>Lactobacillus brevis</i> OPY-1 <i>Streptococcus thermophilus</i> APC151	Lait fermenté Lait fermenté Lait fermenté Jus de soja fermenté Yaourt	Antidiabétique, Antihypertensif

➤ Les composés bioactifs produits par fermentation

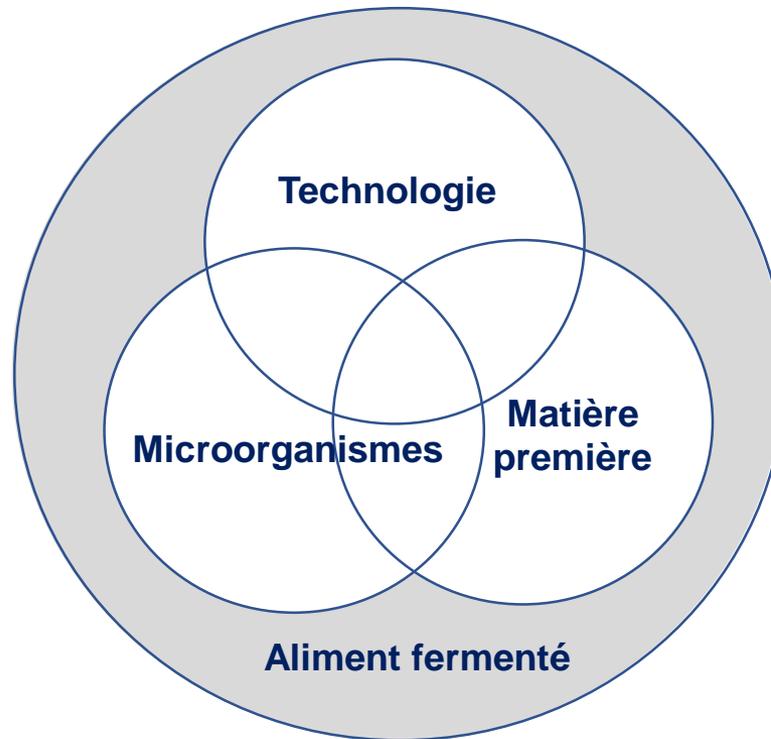
Composés bioactifs	Souches productrices	Produits alimentaires	Effets santé
Peptides bioactifs	<i>Lactobacillus helveticus</i> Evolus R <i>Lactobacillus helveticus</i> / <i>S. cerevisiae</i> (Calpis™) <i>Lactobacillus bulgaricus</i> LB340	Lait fermenté Lait fermenté Lait fermenté / Yaourt	Antihypertensif Antihypertensif Antihypertensif, immunomodulateur
Bactériocines	<i>Lactococcus lactis</i> CNRZ150/TAB50 <i>Lactococcus lactis</i> DPC3147 <i>Lactobacillus acidophilus</i> CH5 <i>Pediococcus acidilactici</i> CHOOZIT™ <i>Lactobacillus plantarum</i> WHE92	Camembert, fromages à pâte pressée Cheddar Yaourt Cheddar/Fromages à pâte pressée Munster	Inhibition de pathogènes

➤ Les composés bioactifs produits par fermentation

Composés bioactifs	Souches productrices	Produits alimentaires	Effets santé
Acide Linoléique Conjugué (CLA)	<i>Lactococcus lactis</i> CI4b	Cheddar	Réduction du cholestérol
	<i>Lactobacillus rhamnosus</i> C14, <i>Lactobacillus casei</i> CRL431, <i>Streptococcus thermophilus</i> CRL728, <i>Bifidobacterium bifidum</i> CRL1399	Mozzarella de bufflesse	
	<i>Lactococcus lactis</i> LMG, <i>Lactobacillus acidophilus</i> Lac1, <i>Lactobacillus plantarum</i> -2, <i>Bifidobacterium animalis</i> Bb12	Lait de bufflesse fermenté	
	<i>Lactobacillus bulgaricus</i> LB430/ <i>Streptococcus thermophilus</i> TA040	Yaourt	
1,4-dihydroxy-2-naphtoic acid (DHNA)	<i>Propionibacterium freudenreichii</i>	Fromage type Emmental	Effet bifidogène
Exopolysaccharides	<i>Lactobacillus bulgaricus</i> OLL1073R-1	Yaourt	Immunostimulation
	<i>Lactobacillus mucosae</i> DPC 6426	Yaourt / Cheddar	Hypocholestérolémiant
	<i>Propionibacterium freudenreichii</i> KG15/KG6	Fromage turcs	Modulation du microbiote
	<i>Lactococcus lactis</i> SMQ-461	Cheddar	Modulation du microbiote
	<i>Lactobacillus plantarum</i> YW11	Kefir	Modulation du microbiote
	<i>Bifidobacterium longum</i> CCUG52486	Yaourt	Immunomodulation
	<i>Streptococcus thermophilus</i> zlwTM11	Yaourt	Modulation du microbiote
	<i>Streptococcus thermophilus</i> FD-DVSST-BODY3	Crème glacée fermentée	Modulation du microbiote

➤ Les aliments fermentés

l'une des plus anciennes méthodes de conservation des aliments
Une des premières formes de biopréservation



➤ Les aliments fermentés

Les aliments fermentés, une histoire ancienne...

First dairying in green Saharan Africa in the fifth millennium bc

J Dunne et al. Nature **486**, 390-394 (2012) doi:10.1038/nature11186



Représentation rupestre d'élevage, de traite de ruminants et de manipulation du lait...

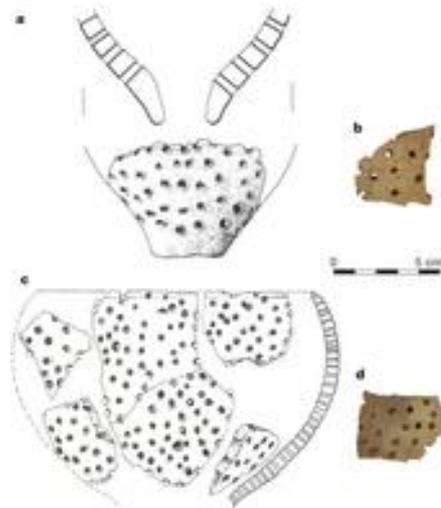
➤ Les aliments fermentés

Les aliments fermentés, une histoire ancienne.....

Earliest evidence for cheese making in the sixth millennium bc in northern Europe

Salque et al., 2013. 493(7433):522-5. doi: 10.1038/nature11698.

Pottery vessel
Lipids analysis



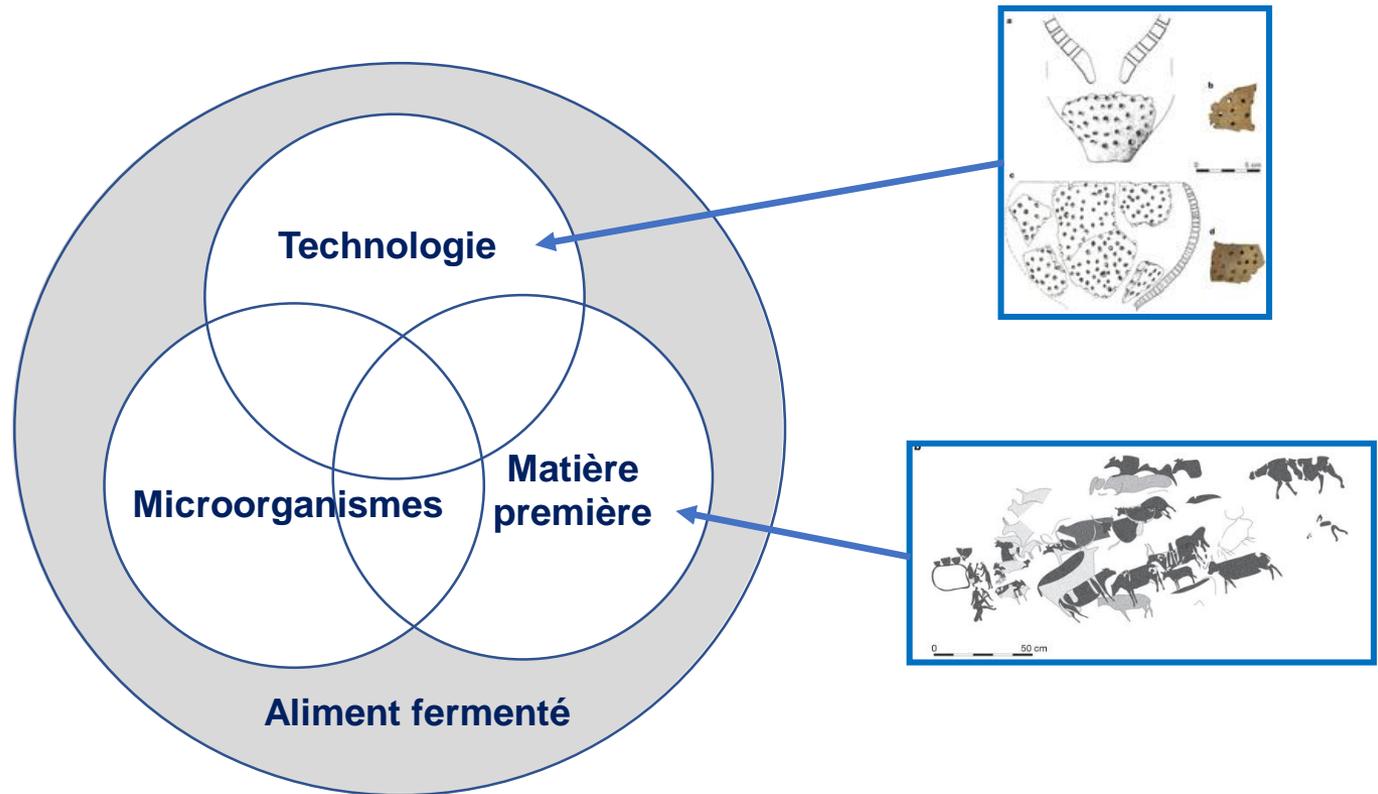
Critical step in making milk less perishable, and more digestible for early prehistoric farmers

- 8000 years

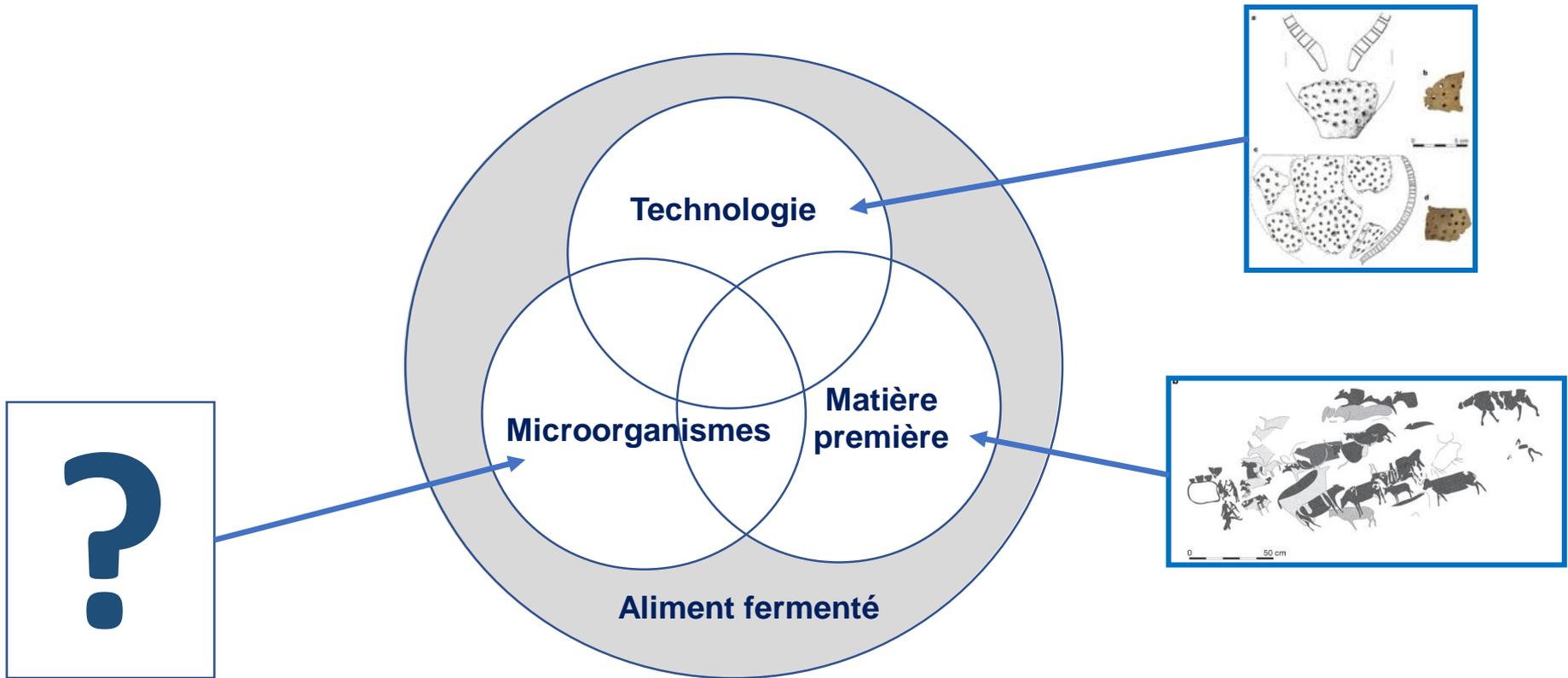
nature

Des traces de lipides laitiers montrent que ces poteries ont servie à égoutter du lait...
Rendre le lait moins périssable et plus digeste...

➤ Les aliments fermentés



➤ Les aliments fermentés



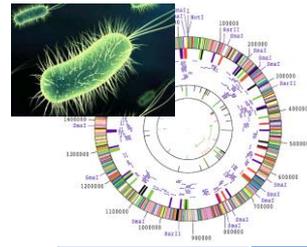
➤ Des premiers microscopes à l'avènement des « omics »



17^e siècle. Première observation de microorganismes
(A. van Leeuwenhoek)



1860. Travaux de Pasteur sur la fermentation

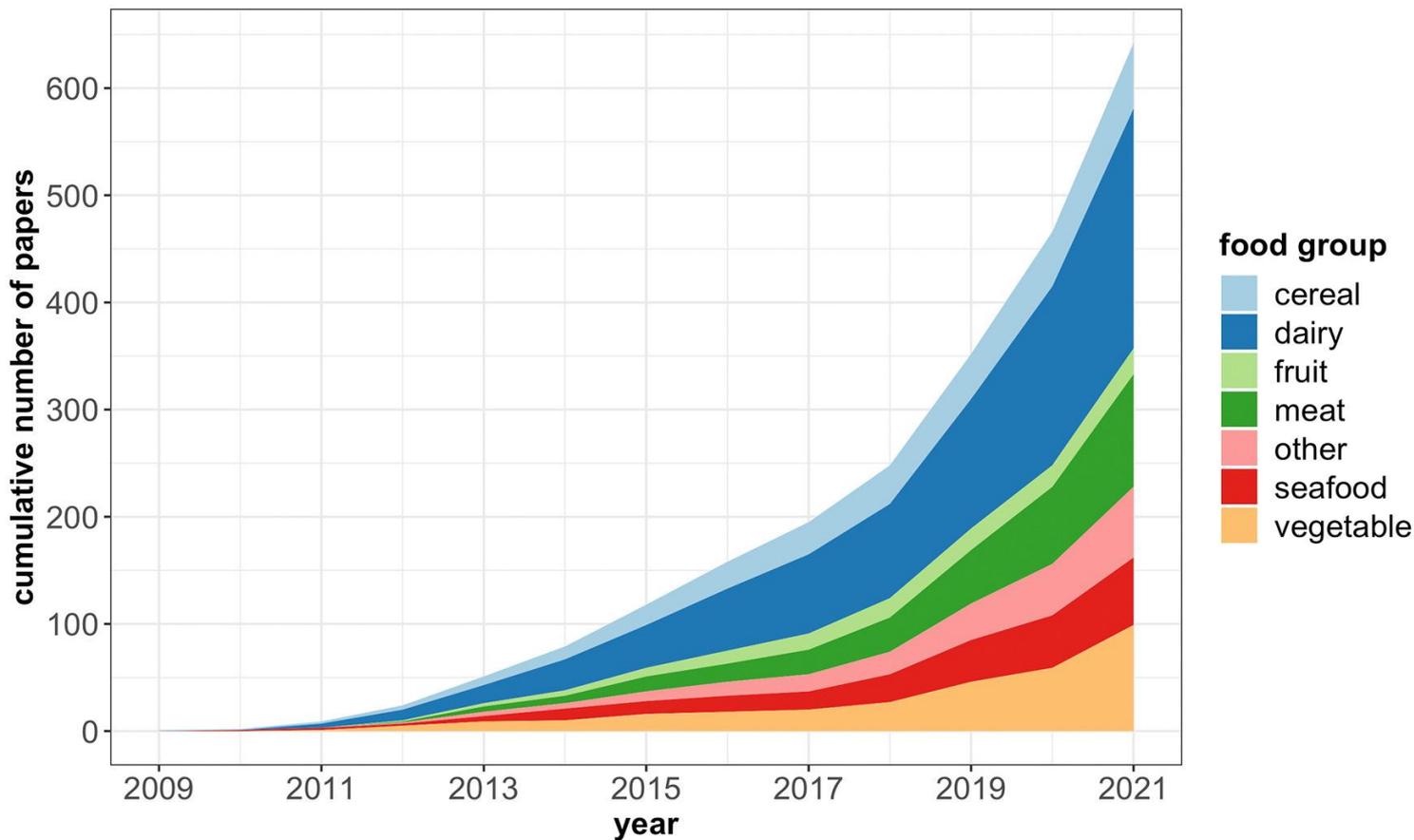


1990. Premiers génomes bactériens séquencés



2000. NGS et séquençage des premiers microbiotes

➤ Les microbiotes alimentaires



Parente et al. , 2022. Int J Food Microbiol 2:372:109696.
doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109696.

➤ Les microbiotes alimentaires



Meilleure connaissance du microbiote des olives de Nyons. Ensemencement avec consortium de 8 souches de levures endogènes → Réduction (à 8%) de la teneur en sel des saumures

Penland et al., 2022. doi: 10.1016/j.foodres.2022.111069



23 espèces de bactéries lactiques identifiées dans des légumes lactofermentés

Thierry et al., 2023. doi: 10.3389/fmicb.2023.1323424.



Jambons cuits bios saumurés : Microbiote dominé par Proteobacteria (*Pseudomonas*, *Serratia*, *Psychrobacter*, or *Vibrio*). Combinaison haute pression + *L. lactis* (biopréservation) pour réduire nitrites tout en évitant l'altération.

Chaillou et al 2022, doi: 10.3390/microorganisms10020456



Selon mode de découpe (chipolatas) : émergence de *Dellaglioia algida* et *Lactobacillus algidus*, bactéries lactiques altérantes

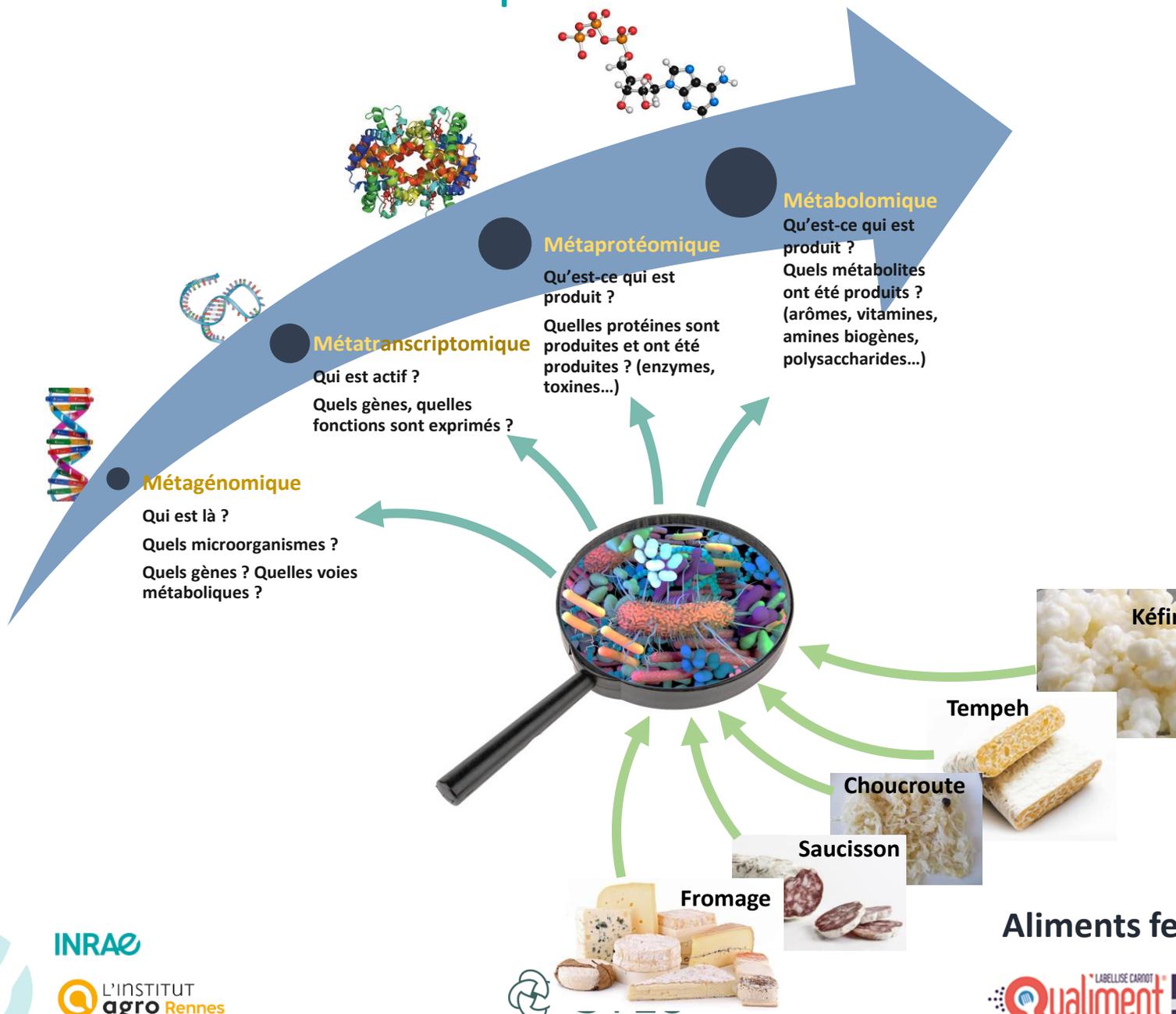
Säde et al 2020, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2019.108379



Présence de bactéries halophiles et halotolérantes des genres *Halomonas* et *Psychrobacter* à la surface de fromages.

Kohte et al., 2021. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109312

➤ L'avènement des « omiques »



INRAE

L'INSTITUT
agro Rennes
Angers



Qualiment
LABELLISÉ CARROT
Réseau de recherche pour l'innovation alimentaire

➤ Les aliments fermentés

Une longue histoire... et de nouveaux challenges

Accompagner les transitions

Vers une diète plus végétale

Légumes lactofermentés

Vromages et autres innovations

Acceptabilité de ces innovations ? *Cf Céline Laisney*

La fermentation, un outil pour la conservation :

sans additifs

peu d'énergie

mais aussi pour :

améliorer la valeur nutritionnelle

éliminer les facteurs antinutritionnels

modifier le goût, texturer

apporter une valeur santé



> Les aliments fermentés



COST Action CA20128

PIMENTO

Promoting Innovation of ferMENTed fOods

<https://fermentedfoods.eu/>



Harnessing the microbial potential of fermented foods for healthy and sustainable food systems

Cf Stéphane Chaillou



<https://www.fermentsdufutur.eu/>

INRAE

L'INSTITUT
agro Rennes
Angers

STLO

LABELLISÉ CARROT
Qualiment
Réseau de recherche pour l'innovation alimentaire

➤ Ferments du Futur

SENSORIEL



Optimisation organoleptique de produits fermentés traditionnels et de nouveaux aliments (alternatives végétales aux matrices animales, nouvelles sources de protéines)

NUTRITION



Optimisation des profils nutritionnels des aliments (réduction sucre/sel, production de vitamines)

Augmentation de la biodisponibilité des nutriments

Développement d'aliments destinés à des populations aux besoins spécifiques

DURABILITÉ



Optimisation des procédés

Adaptation aux variations de matières premières, diminution de l'impact environnemental (énergie, eau)

Réduction du gaspillage alimentaire

Valorisation des coproduits

Développement d'approches fermentaires pour la biofertilisation & bioprotection des cultures

NATURALITÉ



Développement d'approches fermentaires en remplacement d'additifs pour la conservation des aliments « clean label »

SANTÉ



Evaluation de la sécurité des nouveaux ferments et aliments fermentés

Optimisation / rétablissement des microbiotes de l'hôte

Développement de nouveaux pré/pro/post-biotiques et métabolites associés

➤ Ferments du Futur

4 axes stratégiques pour la recherche et l'innovation

- 1- La conception de communautés microbiennes stables issues de la biodiversité naturelle et adaptées aux matrices et procédés cibles
- 2- Des conduites de fermentation optimisées jusqu'à l'échelle pilote
- 3- L'optimisation des interactions entre aliments fermentés, microbiotes et santé
- 4- Une utilisation transversale des sciences des données et de l'intelligence artificielle



Des projets de recherche précompétitive et compétitive

➤ Ferments du Futur

6
organismes ESR



8
organisations
professionnelles



9 grands groupes



7 ETI/PME



8 start-ups



24 entreprises



INRAE

L'INSTITUT
agro
Rennes
Angers

STLO

Qualiment
Réseau de recherche pour l'innovation alimentaire

➤ Fermentation de précision

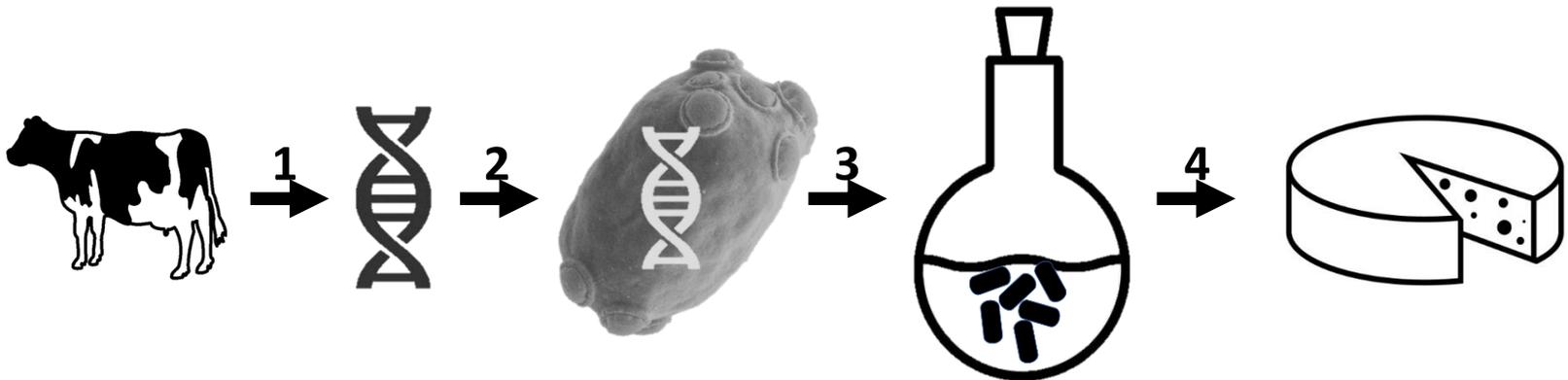
➤ La fermentation de précision

Définition :

Utilisation de microorganismes (procaryotes ou eucaryotes) pour la production d'ingrédients à destination santé ou alimentaire (polysaccharides, protéines, lipides/acides gras oméga-3, vitamines, minéraux et fibres alimentaires).

Elle implique la (re)programmation de microbes pour produire des molécules organiques complexes.

Comment ça marche ?



➤ La fermentation de précision

Vous avez dit « Fermentation » ?

Microorganismes cultivés dans les « fermenteurs ».

Microorganismes les plus utilisés :

- levures (*Pichia pastoris*, *Trichoderma reesei*, *Yarrowia lipolytica*...)
ou microalgues (*Schizochytrium* sp.)

Cultivées en aérobiose. Métabolisme respiratoire (et non fermentaire)

➤ Une nouvelle révolution agricole ?

Productions à visées pharmaceutiques et médicales

1982, Genentech produit de l'insuline humaine à partir d'*Escherichia coli*

Première protéine recombinante autorisée à la commercialisation par la FDA (USA)

Puis : hormone de croissance, anticorps monoclonaux, cytokines...

INRAE

Production d'ingrédients alimentaires

1990, Pfizer produit et commercialise la première présure bovine.
Commercialisation autorisée par la FDA.

Puis: HMOs pour des formules infantiles (2010), Léghémoglobine, Lactases...

Production de matières premières alimentaires

2000. Premiers essais de production de viande et de lait sans vache

➤ Viande, lait, œuf... « Animal free »



Agriculture Cellulaire

Cf F. Baglinière et P. Corre



Fermentation de précision

Cf P. Barrucand



INRAE

L'INSTITUT
agro Rennes
Angers

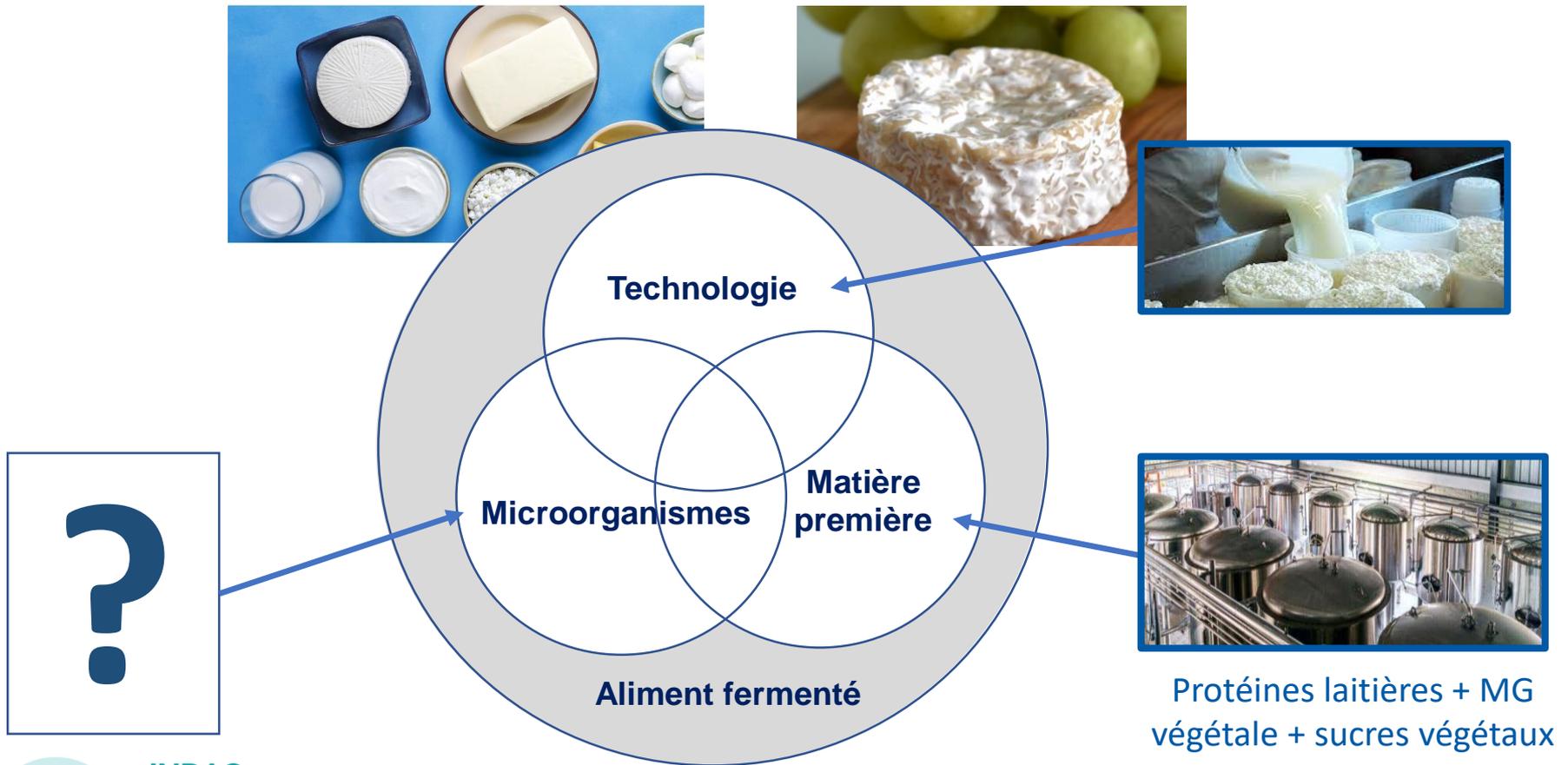
STLO

Qualiment
LABELLISÉ CARROT
Réseau de recherche pour l'innovation alimentaire

➤ Là où les Athéniens s'atteignent...

Fermentations « traditionnelles » et de précision sont-elles conciliables ?

Cf Thibault Loiseleux



➤ **Merci pour votre attention**

<https://stlo.rennes.hub.inrae.fr/>



INRAE

 **L'INSTITUT
agro Rennes
Angers**

 **STLO**

 **Qualiment**
LABELLISÉ CARIOT
Réseau de recherche pour l'innovation alimentaire